

文章编号: 1001-1455(2007)03-0251-08

# 可燃气体中激波与障碍物作用在下游形成爆轰波的数值研究

滕宏辉, 吕俊明, 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 对平面激波和单个矩形障碍物作用的过程进行了数值模拟, 研究了反射产生的上行爆轰波在下游可燃气体中形成爆轰波的过程。数值结果表明, 下游爆轰波形成过程主要有 2 种模式: 爆轰波直接绕射和绕射波在上壁面反射, 这和已有的实验结果是一致的。通过研究下游爆轰波的形成过程受入射激波马赫数、混合气体的压力和管道尺度的影响, 分析了上游爆轰波向下游传播的波动力学过程, 讨论了 2 种形成过程的作用规律和控制因素, 阐明了下游爆轰波的形成规律。

**关键词:** 爆炸力学; 波的绕射; 数值模拟; 爆轰波; 激波

中图分类号: O381

国标学科代码: 130.3510

文献标志码: A

## 1 引 言

爆轰波的形成涉及激波和燃烧的相互作用, 是爆轰物理研究领域的一个难点, 这方面的研究对于爆轰推进、爆轰驱动和爆炸灾害预防都有指导意义。由于爆轰波可看作强激波诱导的燃烧过程, 因此利用较弱激波的反射和聚焦形成爆轰波是一个重要的研究方向。C. R. Kaplan 等<sup>[1]</sup>利用单步化学反应模型对激波在乙炔/空气混合气体中与挡板作用形成爆轰的过程进行了数值模拟。C. K. Chan<sup>[2]</sup>对激波和组合障碍物的作用诱导爆轰的过程进行了实验研究, 着重阐明了高速爆燃波形成爆轰过程中湍流的作用。B. E. Gelfand 等<sup>[3]</sup>和董刚等<sup>[4]</sup>分别对平面激波反射聚焦形成爆轰的情况进行了实验和数值模拟, 研究了不同马赫数的激波聚焦诱导的爆燃波和爆轰波。滕宏辉等<sup>[5]</sup>对环形激波聚焦进行了数值模拟, 研究了爆轰形成的临界条件及其影响因素。平面激波与单个矩形障碍物作用涉及到波的多次绕射和反射过程, 其中对障碍物下游的爆轰波形成规律进行研究具有重要意义。C. J. Brown 等<sup>[6]</sup>对利用纹影和烟迹技术对不同气体中的激波与矩形障碍物作用进行了实验, 发现了 2 种下游爆轰波的形成过程: (1) 障碍物上游的爆轰波较强, 能够直接在下游形成爆轰波; (2) 上游爆轰波较弱, 产生向下游传播的爆燃波, 进而通过绕射波在上壁面反射形成爆轰。以前对激波与障碍物作用形成爆轰的数值模拟中采用了单步化学反应模型, 由于这种模型过于简化而不能描述详细的链式反应机理, 不适于对点火、起爆等问题的研究。如 C. R. Kaplan 等<sup>[1]</sup>的计算结果显示在给定条件下马赫数为 1.3 的激波能够诱导爆轰波, 但是实验中发现马赫数为 3.0 的激波尚不能点燃气体。虽然实验中发现了 2 种爆轰波形成过程, 但对下游爆轰波形成的影响因素, 如激波马赫数、气体压力, 没有进行系统研究<sup>[6]</sup>。本文中利用基元反应模型对激波与单个矩形障碍的作用进行数值研究, 模拟障碍物下游爆轰波形成的波动力学过程, 讨论入射激波马赫数、混合气体的压力和管道尺度对下游爆轰波形成过程的影响, 阐明下游爆轰波的形成规律。

## 2 物理模型和数值方法

激波和单个矩形障碍物作用如图 1 所示。右行激波在充满可燃气体的 2 维管道中传播, 激波前方放置

\* 收稿日期: 2005-12-19; 修回日期: 2006-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90205027, 10276035)

作者简介: 滕宏辉 (1981 — ), 男, 博士研究生。

了 1 个矩形障碍物,阻塞了管道的下半部分。下部的激波与障碍物作用发生反射,上部的激波继续传播然后在障碍物下游发生绕射。如果激波强度足够大,激波反射在障碍物上游能够形成爆轰波。爆轰波向上游传播的同时发生绕射,在障碍物上方形成向下游传播的燃烧带。由于绕射产生了稀疏波,障碍物上方的爆轰波可能发生解耦形成激波和爆燃波,随后绕射波将在上壁面发生反射,同时燃烧带在障碍物下游再次发生绕射,形成更加复杂的波系结构和波动力学过程。

数值模拟中忽略粘性耗散的影响,控制方程选用 2 维多组分守恒型 Euler 方程组,同时采用时间分裂算法将流动和化学反应解耦后分别求解<sup>[7]</sup>。首先在自适应 4 边形无结构网格<sup>[8]</sup>上离散控制方程,并选用了 MUSCL-Hancock 格式和 HLLC 格式<sup>[9]</sup>求解流动过程。化学反应模型对流动过程影响很大,为了提高数值结果的可靠性,选用了 11 种组分 ( $H_2$ 、 $O_2$ 、 $O$ 、 $H$ 、 $OH$ 、 $HO_2$ 、 $H_2O_2$ 、 $H_2O$ 、 $N_2$ 、 $N$ 、 $NO$ ) 23 个反应的基元反应模型,利用 CHEMKIN 程序包求解化学反应<sup>[10]</sup>。左边界指定为超声速来流边界,右边界采用自由出口边界,其余采用滑移壁面条件。初始条件:波前气体是静止的氢气/空气混合气体,化学当量比  $m_{H_2} \quad m_{O_2} \quad m_{N_2} = 2 \quad 1 \quad 4$ ,温度为 298.15 K,压力在不同的算例中取不同的值。波后气体的当量比不变,压力等热力学参数通过指定激波马赫数得到。障碍物的尺寸  $h = 3 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $H = 6 \text{ mm}$ 。初始网格为均匀的  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,经过 5 层均匀加密最小网格为  $0.03125 \text{ mm} \times 0.03125 \text{ mm}$ 。

### 3 数值结果初步验证

为了验证计算结果的可靠性,首先和以前的实验结果进行了对比,如图 2 所示。实验设备管道高 76 mm,障碍高 38 mm,宽 25 mm。图 2(a) 上方显示了在压力为 20 kPa 的  $C_3H_8 + 5O_2 + 18Ar$  气体中马赫数为 3.0 的激波形成爆轰波的纹影图,图 2(a) 下方显示了在压力为 5.4 kPa 的  $C_2H_4 + 3O_2 + 12Ar$  气体中马赫数为 3.2 的激波形成爆轰波的纹影图。可以看到,第一种情况下上游的爆轰波能够绕射到障碍物下游,从而在整个激波面上几乎同时形成爆轰波;第二种情况下爆轰波由于绕射发生了解耦,火焰面无法直接赶上前导激波,但是在上壁面反射的作用下形成了沿波面传播的横向爆轰波。图 2(b) 上方显示了压力为 100 kPa 的  $2H_2 + O_2 + 4N_2$  气体中马赫数为 3.15 的激波形成爆轰波的过程,图 2(b) 下方显示了压力为 40 kPa 的  $2H_2 + O_2 + 4N_2$  气体中马赫数为 3.5 的激波形成爆轰波的过程。可以看到数值结果显示了绕射爆轰波直接在下游形成爆轰和通过上壁面反射形成横向爆轰 2 种情况,和实验结果符合较好。虽然由于计算能力的限制,模拟中选择了具有较简单化学反应机理的可燃气体,并且模拟尺度也远小于实际的实验尺度,但是数值结果成功地模拟了实验给出的 2 种情况,说明可以用目前的程序研究激波与障碍物作用诱导的下游爆轰波形成规律。

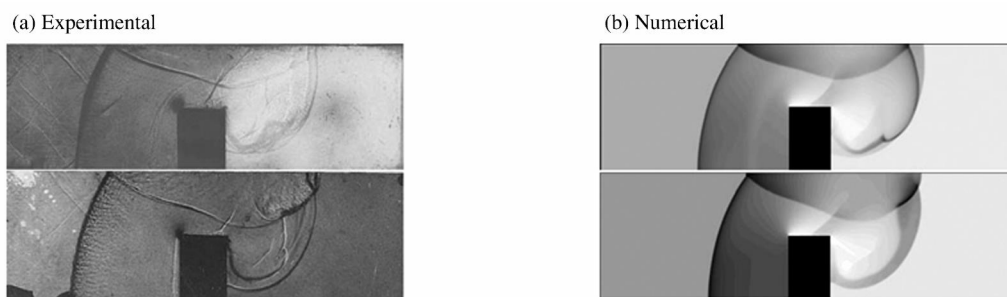


图 2 下游爆轰波的 2 种形成过程

Fig. 2 Two kinds of the initiation processes of the downstream detonation

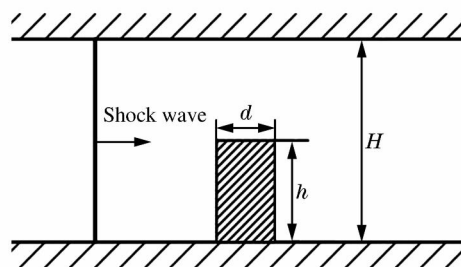


图 1 激波和障碍物作用示意图

Fig. 1 Sketch of interaction between shock wave and obstacle

## 4 数值结果讨论与分析

### 4.1 马赫数对爆轰波形成的影响

图3显示了马赫数为3.5的激波在压力为50 kPa的气体中形成爆轰波的过程。首先下部的激波在障碍物上发生反射,形成上行的爆轰波,同时在障碍物上方形成了弧形的绕射波面,如图3(a)所示。对比压力和温度曲线可以看到,绕射波面上存在爆轰波的解耦点,该点前方是单独传播的激波和爆燃波,后方是爆轰波。由于爆轰波的传播速度较大,因此后方的爆轰波逐渐卷起向前吞噬解耦波面。在本算例给定的条件下,爆轰波的解耦点运动到了弧形波面最高点的前方,从而形成了向下游传播的爆轰波。向下游传播的爆轰波逐渐赶上前方的激波波面,同时在弧形波面的上壁面反射形成了更强的爆轰波,也向前赶上前导激波,如图3(b)所示。向下游传播的爆轰波下方存在经过激波压缩的具有较高的温度和密度的预处理气体,因此进一步形成了沿下游绕射激波波面运动的横向爆轰波,如图3(c)所示。同时在壁面附近反射的爆轰波波面赶上了绕射爆轰波,在上壁面附近形成了横向运动的激波。随后绕射形成的横向爆轰波逐渐将爆轰波扩展到整个波面上,而反射产生的横向激波在已反应气体中传播,强度逐渐变弱以至消失,如图3(d)所示。

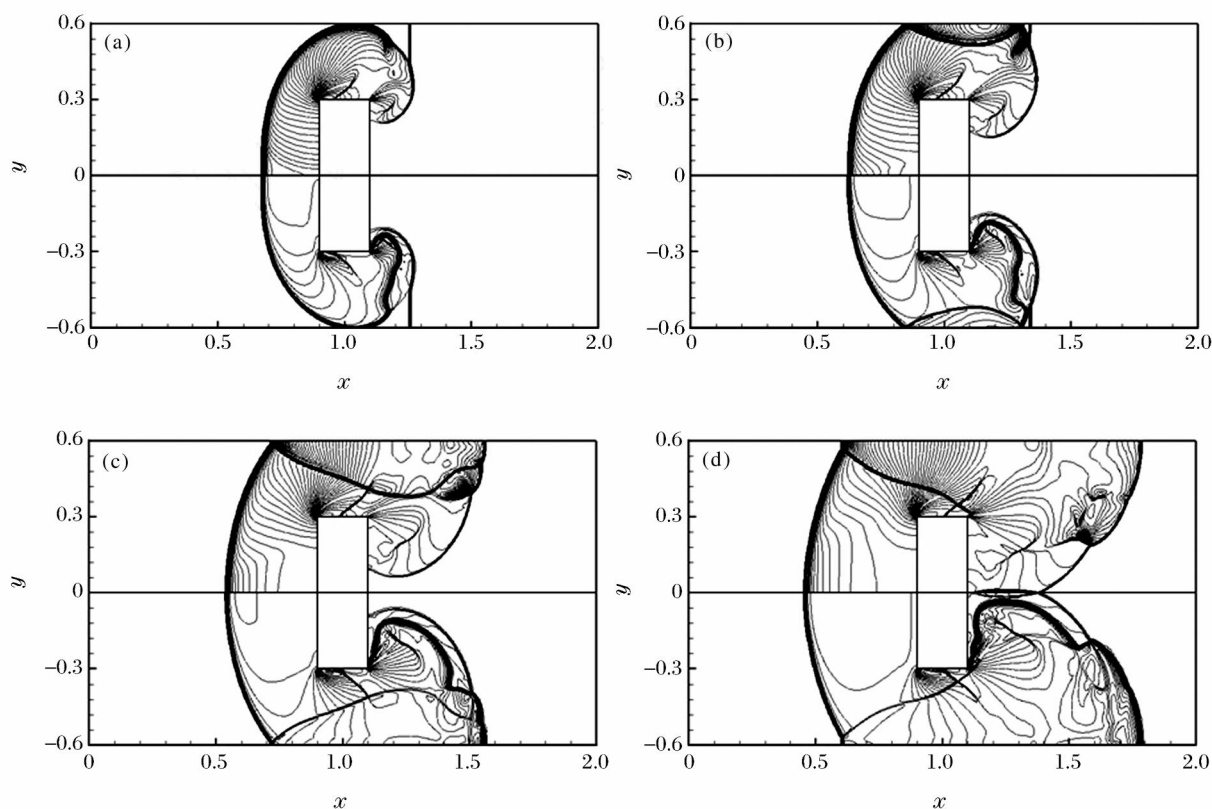


图3 马赫数为3.5的激波在压力为50 kPa的气体中形成爆轰波的过程

Fig. 3 Pressure (upper) and temperature (lower) in the detonation initiation process with the incident Mach number 3.5 and gas mixture pressure 50 kPa

马赫数为3.0和3.7的激波在压力为50 kPa的气体中形成爆轰波的流场如图4所示。在这2个不同的马赫数下,下游爆轰波的形成过程基本相同:绕射首先形成向下游传播的爆轰波,进而形成了沿下游绕射激波波面传播的横向爆轰波;上壁面反射形成了横向激波,但是它在传播过程中变弱并消失。因此,对于压力为50 kPa的气体中爆轰波的形成,起主导作用的是波的绕射,改变入射激波马赫数并不能改变下游爆轰波形成的主要波动力学过程。由图4与图3(c)的比较可见,上壁面附近的爆轰波到达

相同位置时,马赫数低的激波传播距离较远,马赫数高的激波传播较近。这说明马赫数低的激波形成爆轰较缓慢,而马赫数高的激波形成爆轰较迅速。这是由于马赫数越高,激波反射后波后温度越高,因而化学反应诱导时间较短,同时反应放热比较迅速。进一步的计算发现,马赫数小于 3.0 的激波与障碍物作用不能形成点火及上行的爆轰波,而马赫数大于 3.7 的爆轰波形成过程更加迅速。因此,改变激波的马赫数对爆轰波的形成过程没有影响,但是随着马赫数的增加,爆轰波的形成更加迅速。

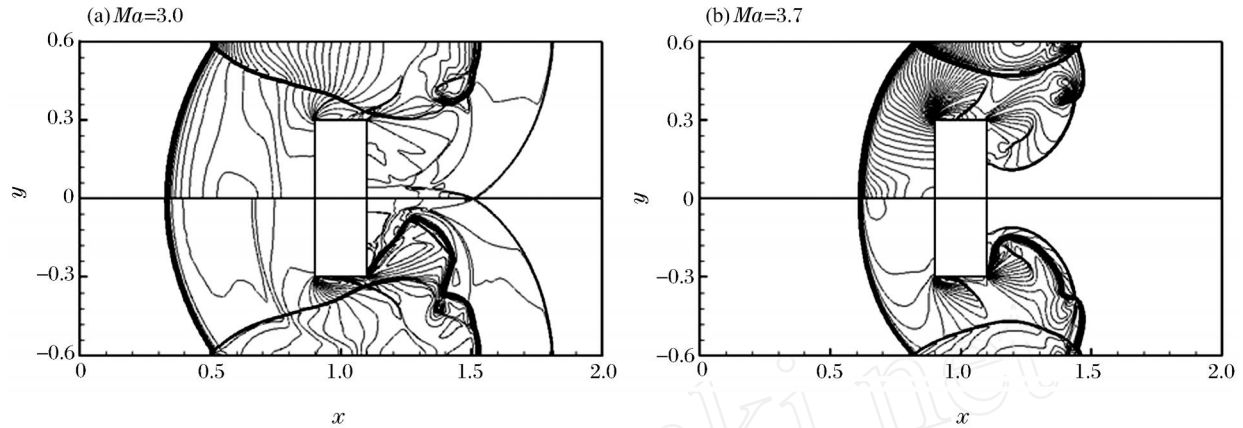


图 4 不同马赫数的激波在压力 50 kPa 的气体中形成爆轰波的流场压力(上)和温度(下)

Fig. 4 Pressure (upper) and temperature (lower) in the detonation initiation process with the different incident Mach number and gas mixture pressure 50 kPa

#### 4.2 气体压力对爆轰波形成的影响

为了研究混合气体的压力对下游爆轰波形成的影响,分别模拟了马赫数为 3.5 的激波在压力为 20、40 和 60 kPa 的气体中形成爆轰波的情况,如图 5 所示。在压力为 20 kPa 的气体中反射产生的上行爆轰波强度较弱,绕射解耦点始终位于弧形波面最高点的上游,因此发生上壁面反射的是激波,如图 5(a) 所示。激波反射不能形成爆轰波,前导激波面及其后方的爆燃波独立传播没有在下游形成爆轰波,如图 5(b) 所示。在压力为 40 kPa 的气体中解耦点比较靠前,上壁面反射前已经运动到了绕射波面最高点下游,如图 5(c) 所示。反射迅速形成较强的下行爆轰波,进而形成横向爆轰波,如图 5(d) 所示,这是通过反射形成爆轰波的情况。在压力为 60 kPa 的气体中,绕射爆轰波的更不容易解耦,通过爆轰波绕射就能够在上壁面附近形成了向下游传播的爆轰波,如图 5(e) 所示。绕射爆轰波形成了沿下游绕射波面传播的横向爆轰波,而反射爆轰波形成的横波逐渐变弱消失,如图 5(f) 所示,这是通过绕射形成爆轰波的情况。以上差异的产生原因在于,气体压力对于爆轰波强度有很大的影响,不同压力下的爆轰波绕射和解耦过程相差很大,进而影响了下游爆轰波的形成过程:随着气体压力的升高,依次出现了没有形成爆轰波、反射形成爆轰和绕射形成爆轰波这 3 种情况。

由于下游爆轰波的形成涉及上游爆轰波的绕射、解耦和反射,因此爆轰波的解耦点的运动是下游爆轰波形成的关键。图 6 显示了不同气体压力下爆轰波解耦点到达上壁面位置。随着气体压力的升高解耦点的位置向下游移动,从而引发了不同的爆轰波形成模式。在气体压力为 20 和 25 kPa 的情况下,解耦点位置在远离弧形绕射波面最高点的上游,没有在下游形成爆轰波(在图中用“ ”号标示);气体压力为 30 kPa 的情况下,解耦点位置仍然位于弧形绕射波面最高点上游,但是比较靠近最高点,最终能够通过反射在下游形成爆轰波(在图中用“ ”号标示);气体压力为 35 和 40 kPa 的情况下,解耦点位置位于弧形绕射波面最高点的下游,通过壁面反射迅速形成较强的横向爆轰波(在图中用“ ”号标示)。在压力为 45 kPa 及其以上的气体中,爆轰波的解耦点在到达上壁面之前,就被绕射产生的爆轰波湮没。总之,对于相同马赫数的激波,气体的压力升高导致解耦点到达上壁面的位置向下游移动,进而改变了流动的波动力学过程,使得下游爆轰波的形成更容易。

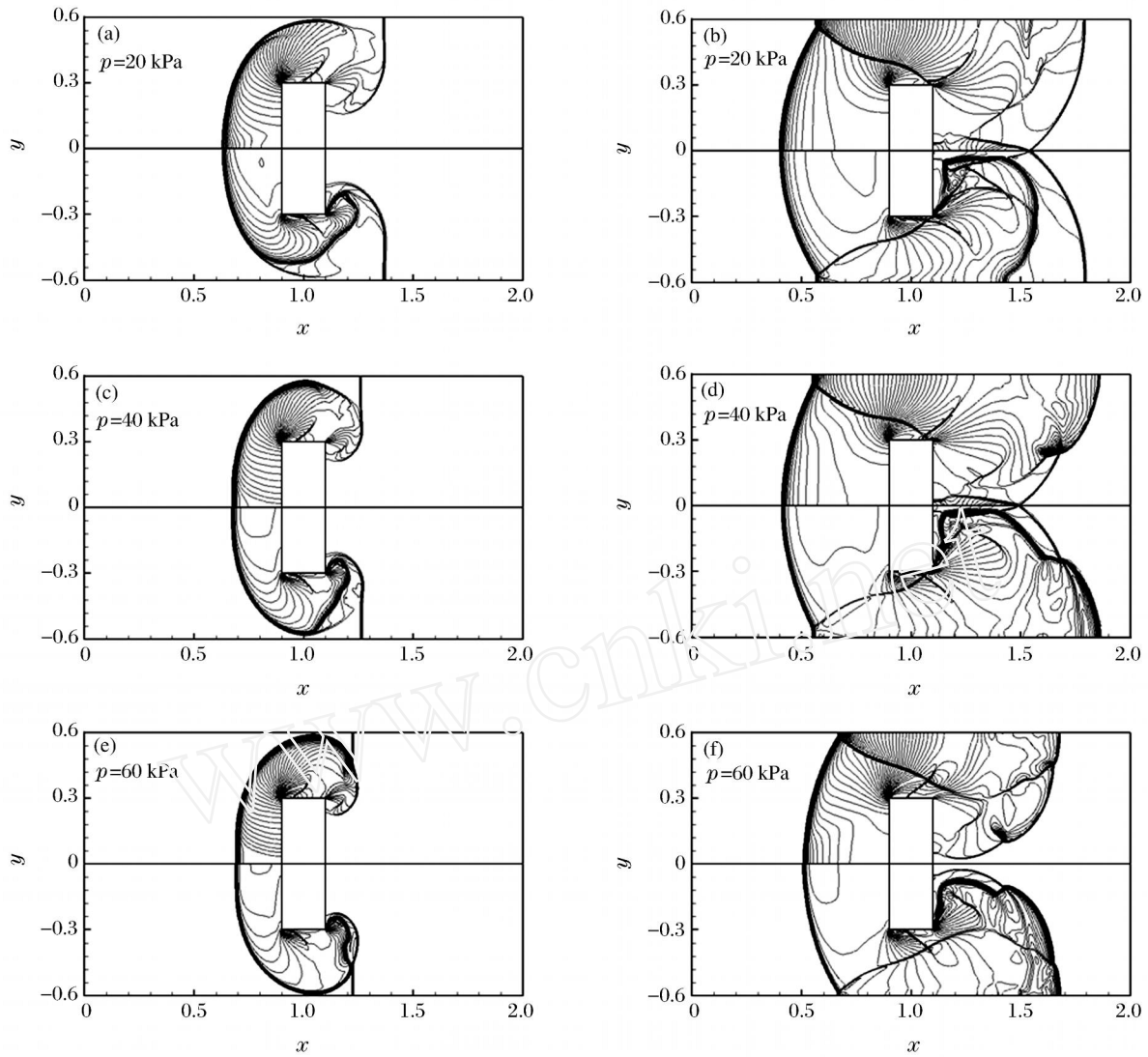


图 5 马赫数 3.5 的激波在不同压力的气体中形成爆轰波的流场压力(上)和温度(下)

Fig. 5 Pressure (upper) and temperature (lower) in the detonation initiation process with the incident Mach number 3.5 and different gas mixture pressures

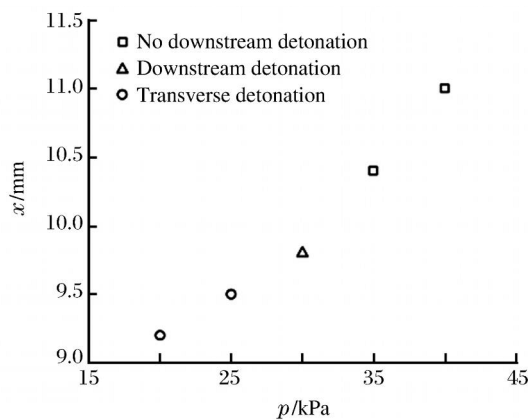


图 6 不同气体压力下爆轰波解耦点到达上壁面位置

Fig. 6 Positions on the upper wall when the detonation decoupling points reach in the gases with various pressure

### 4.3 管道高度对爆轰波形成的影响

下游爆轰波的形成涉及波绕射和反射过程的耦合作用,而改变管道高度可以使绕射强化、反射推迟,因此对下游爆轰波的形成必然产生影响。图 7 显示了高度为 10 mm 的管道中马赫数为 3.5 的激波在压力为 40 kPa 的气体中形成爆轰波的过程。首先通过反射形成了上行爆轰波并且发生绕射,爆轰波的解耦点传播到了弧形波面最高点下游形成了下行爆轰波,如图 7(a) 所示。下行爆轰波在弧形波面发生反射之前就赶上了前导激波,形成了沿下游绕射激波波面运动的横向爆轰波,如图 7(b) 所示。随后弧形爆轰波发生反射,产生了较强的爆轰波赶上前导波面,同时绕射形成的横波逐渐将爆轰波扩展到整个波面上,如图 7(c) 所示。和高度为 6 mm

的管道中相同马赫数和气体的形成过程(如图 5(c)和图 5(d)所示)相比,下游爆轰波形成的波动力学过程发生了根本变化:由于管道高度的增加导致绕射过程的强化,在弧形波面到达上壁面之前就形成了下行的爆轰波和横波,因此在本算例中下游爆轰波是通过绕射形成的。总之,管道高度能够对绕射和反射过程的产生影响,进而改变下游爆轰波的形成过程。

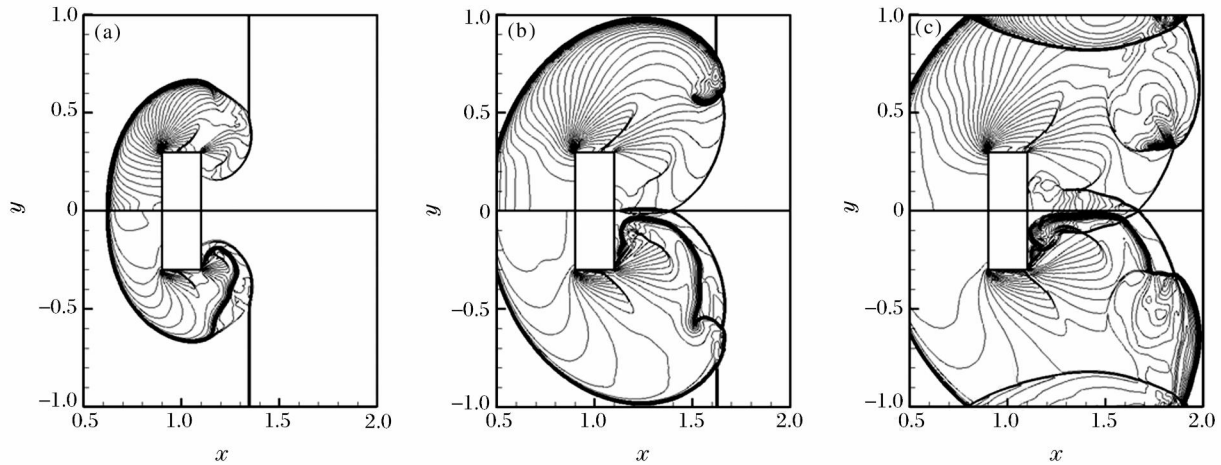


图 7 加高管道中马赫数 3.5 的激波在压力 40 kPa 的气体中形成爆轰波的流场压力(上)和温度(下)

Fig. 7 Pressure (upper) and temperature (lower) in the detonation initiation process in the high tube with the incident Mach number 3.5 and gas mixture pressure 40 kPa

为了系统地研究管道高度的影响,对相同的障碍物、气体参数和激波马赫数,计算了高度为 4 ~ 10 mm 的管道中爆轰波的形成过程,其中绕射爆轰波的解耦点或最高点到达上壁面的位置如图 8 所示。随着管道高度的增加,解耦点的位置向下游移动,从来引发了不同的爆轰波形成过程。在高度为 4 mm 的管道中绕射爆轰波到达上壁面较早,因此解耦点比较靠近上游,没有形成爆轰波;在高度为 5 mm 的管道中,绕射波反射前解耦点同样位于最高点上游,但是非常靠近最高点,因此通过反射形成了爆轰波;在高度为 6 mm 的管道中,绕射波反射前解耦点位于最高点下游,因此通过反射很容易形成了爆轰波。管道高度为 7 ~ 10 mm 的情况下,解耦点不能到达上壁面就被横波湮没,主要通过绕射在下游形成爆轰波,绕射波的最高点到达上壁面的位置同样随着管道高度向下游移动。因此,管道高度的增加导致了绕射爆轰波的解耦点位置向下游移动,从而更容易形成爆轰波。

综上所述,通过对若干爆轰波形成过程的数值模拟,发现入射激波马赫数主要影响爆轰波的形成时间,而气体压力和管道高度对爆轰波形成的波动力学过程有较大的影响,较高的压力和管道高度有利于爆轰波的形成。这是因为较高的压力使爆轰波不容易解耦,而较大的管道高度可以使爆轰波绕射增强。这 2 种情况都能够使爆轰波的解耦点更靠近下游,从而更容易形成爆轰波。但是比较图 6 和图 8 可见,即使解耦点到达上壁面时的位置相同,对于不同气体压力和管道高度的流动也可能产生不同的爆轰波形成过程。对比上述数值结果发现,控制下游爆轰波形成的关键在于解耦点在绕射波面上的相对位置:解耦点位于最高点下游肯定能形成爆轰波;解耦点位于最高点上游时,如果两者距离非常近,就能通过激波和爆轰波的依次反射形成爆轰波,如果两者距离较远爆轰波反射较弱则不能形成爆轰波。

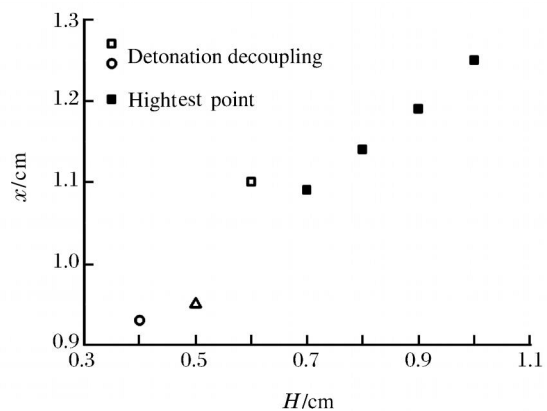


图 8 不同高度的管道中爆轰波解耦点或最高点到达上壁面位置

Fig. 8 Positions on the upper wall when the detonation decoupling or highest points arrive in various height tubes

## 5 结 论

对平面激波和单个矩形障碍物作用的过程进行了数值模拟,研究了上行爆轰波通过绕射和反射在下游形成爆轰的过程,主要结论概括如下:(1)激波反射在障碍物上游产生了上行爆轰波,进而通过爆轰波直接绕射和绕射波在壁面反射2种模式,在障碍物下游形成爆轰波,这和以前的实验结果是一致的。(2)爆轰波的形成时间随着入射激波马赫数的增加而提前,较高的气体压力和较大的管道高度有利于爆轰波的形成。(3)下游爆轰波的形成是上游爆轰波绕射和反射的结果,其中绕射波发生上壁面反射时,爆轰波解耦点相对绕射波面最高点的位置是下游爆轰波形成的关键。

## 参考文献:

- [1] Kaplan C R, Oran E S. Mechanisms of ignition and detonation formation in propane-air mixtures[J]. *Combustion Science and Technology*, 1991,80(4-6):185-205.
- [2] Chan C K. Collision of a shock wave with obstacles in a combustible mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100(1-2):341-348.
- [3] Gelfand B E, Khomik S V, Bartenev A M, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture[J]. *Shock Waves*, 2000,10(3):197-204.
- [4] 董刚,唐敖,叶经方,等. 激波聚焦诱导爆轰的数值研究[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(5):437-444.  
DONG Gang, TANG Ao, YE Jing-fang, et al. Numerical studies on initiation and detonation induced by shock wave focusing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(5):437-444.
- [5] 滕宏辉,张德良,李辉煌,等. 利用环形激波聚焦实现爆轰波直接起爆的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(6):512-518.  
TENG Hong-hui, ZHANG De-liang, LI Hui-huang, et al. Numerical investigation of detonation direct initiation induced by toroidal shock wave focusing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(6):512-518.
- [6] Brown C J, Thomas G O. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and diffraction of shock waves[J]. *Shock Waves*, 2000,10(1):23-32.
- [7] 李辉煌,杨基明,徐立功. 脉冲爆震发动机喷管流动的数值模拟[J]. *推进技术*, 2004,25(6):553-556.  
LI Hui-huang, YANG Ji-ming, XU Li-gong. A numerical simulation on the nozzle flow of pulse detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004,25(6):553-556.
- [8] Sun M, Takayama K. Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid[J]. *Journal of Computational Physics*, 1999,150(1):143-180.
- [9] Toro E F. *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*[M]. Second ed. Berlin, Springer, 1999.
- [10] Kee R J, Rupley F M. Chemkin-III: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical and plasma kinetics[R]. UC-405, Sandia National Laboratories, 1996.

## Downstream detonation initiation induced by interaction between shock wave and obstacle in combustible gas mixtures

TENG Hong-hui, LI Jun-ming, JIANG Zong-lin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The downstream detonation initiation induced by interaction between the shock wave and the single rectangle obstacle interaction was simulated numerically. The upstream detonation forming and its following wave dynamics which initiated the downstream detonation waves were investigated.

From the numerical results two initiation modes, which were the direct detonation diffraction and the diffraction wave reflection on the upper wall, were found out and validated by the previous experimental results. The processes of the upstream detonation transmitting downstream were analyzed by studying the influences of the incident shock Mach number, gas mixture pressure, and the tube length scale. The operating rules and governing factors of two initiation modes were concluded and the downstream detonation initiation rules were illustrated.

**Key words:** mechanics of explosion; wave diffraction; numerical simulation; detonation wave; shock wave

\* Corresponding author: TENG Hong-hui  
E-mail address: honghuiteng@gmail.com  
Telephone: 86-10-62657877

### 调压大功率恒流源介绍

用于直线感应电子加速器,为励磁线圈提供恒定大电流,用以产生所需要的轴向磁场,以约束电子束的扩散,保持电子束沿轴向传输、箍缩、聚焦。

采用调压式、线性串联调整方案,调整管采用中等功率多只并联,冷却系统仅用散热器和风冷。当电网、电流和负载在较大范围变化时,通过调压模块自动调控恒流源直流供电电压而使调整管工作在较低电压(5~10V)。

工作方式有手动和程控2种。手动方式可预置电流、实测电流,预置恒流源的工作电压,测量调整管的管压降和负载电压,指示三相电网的相电压或线电压;程控方式采用工控机,对多台恒流源点“名”排队发指令,可缓启动、预置工作电流、回取实测电流,控制各台恒流源的直流供电电压和调整管的压降,控制恒流源启动、停止和工作时间,回报各台恒流源的工作状态,有过流过压断相保护措施。

预置电流的准确度可达0.2%,输出电流稳定度小于0.1%,输出纹波(负载上的50和300Hz的纹波峰-峰值与负载直流电压之比)好于0.2%。

《调压式恒流源技术研究》荣获2003年军队科学技术进步奖二等奖。

**主要性能指标** 输出电流:300~500A(HL500A),100~300A(HL300A);负载:0.05~0.1 感性或阻性;输出电流稳定度:0.1%(多台恒流源在强的电磁干扰、地电流干扰和射线辐射的环境下正常稳定工作);稳定电流建立时间:0.2s;纹波(峰-峰值):0.2%;供电:380V×(1±10%)V。



HL500 A 型恒流源



HL500 A / HL300 A 恒流源组  
(中国工程物理研究院流体物理研究所提供)